

고층건물의 풍하중 유발 진동해석

Wind Load Induced Vibration Analysis for Tall Structure

김동현†·김유성*·김요한*·김동만*·이종욱*

Dong-Hyun Kim, Yu-Sung Kim, Yo-Han Kim, Dong-Man Kim and Jong-Wook Kim

Key Words : FIV (유체유발진동), Flow-Structure Interaction (유체-구조 상호작용), Tall Building (고층건물), CFD (전산유체역학), CSD (전산구조동역학)

ABSTRACT

In this study, fluid-induced vibration (FIV) analyses have been conducted for tall building structure. In order to investigate the aeroelastic responses of tall building due to wind load, advanced computational analysis system based n computational fluid dynamics(CFD) and computational structural dynamics (CSD) has been developed. Fluid domains are modeled using the computational grid system with local grid deforming technique. A fully implicit time marching scheme based on the Newmark direct integration method is used for computing the coupled aeroelastic governing equations of tall structure for fluid-structure interaction (FSI) problems. Detailed aeroelastic responses and results are presented to show the physical phenomenon of the tall building.

1. 서 론

최근 국내외적으로 아파트를 비롯한 여러 고층 건물이 건설되고 있다. 고층 건물을 건설하기 위해 소모되는 자재의 효율적 사용을 위하여 구조물의 최적 설계를 함에 따라 고층건물이 갈수록 경량화 및 유연화되고 있다. 이와 같은 고층건물의 경우 구조의 질량과 강성의 감소를 초래하게 되고, 상대적으로 구조의 감쇠효과가 낮아져 동적 불안정성이 야기될 수 있다. 풍하중에 의한 고층 건물의 불안정성이 발생하게 되면 구조물의 안정성에 영향을 주며, 건물 내에 상주하는 사람들에게 신체적 영향을 주어 불쾌감을 주거나 근무 의욕을 감퇴시키는 원인이 된다. 따라서 주거환경에서 풍하중에 의해 발생하는 진동에 대한 설계상의 검토가 필요하다.

외부 풍하중에 의한 건물의 진동에 관한 다수의 연구가 국내외적으로 진행되었다⁽¹⁻⁶⁾. 국내에서는 고층건물을 축소 한 모델을 이용하여 풍동에서 실험을 진행한 사례가 있으며, 구조물에 발생하는 진동을 감소시키기 위한 목적으로 고층건물이 테이퍼를 갖는 경우에 대한 실험도 수행되었다. 하지만 최근 건설되는 고층 건물의 경우 일반적인 형태에

서 벗어난 다양한 형상의 구조가 만들어지고 있다. 구조 형태 변화에 따른 고층건물에 발생하는 진동응답을 모사하기 위하여 반실험적 방법으로 전산유체해석 기법과 전산구조동역학 기법을 연계하여 수치적인 해석 기법을 정립하였다. 3차원 유체유발진동해석 기법은 본 연구실에서 개발하였으며, 검증 모델을 통하여 검토하였다⁽⁷⁾.

본 논문에서는 외부 풍하중에 의해 고층건물에서 발생하는 진동해석을 수행 및 분석하였다. 풍속에 따라 건물에서 발생하는 응답을 추출하였으며, CFD(전산유체역학) 및 CSD(전산구조동역학) 기법을 연계하여 수치적인 계산을 통한 반실험적 방법으로 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 모델의 크기는 64m×33m×116m(가로×세로×높이)이며, 고층건물의 최상층에서 발생하는 진동 응답 특성을 나타내었다.

2. 이론적 배경

2.1 유체유발진동 지배방정식

가. 일반화 공탄성 방정식

물리영역에서 구조 비선형성 및 감쇠를 고려한 탄성체의 운동방정식은 구조적 비선형성을 무시할 수 있는 경우 모드 접근법(modal approach)을 사용하여 자유도를 획기적으로 줄여 효율적인 계산을 수행할 수 있다. Hamilton의 정리를 이용하여 구조비선형성을 무시한 선형 탄성체에 대

† 교신저자; 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : dhk@gnu.ac.kr
Tel : (055) 755-6125, Fax : (055) 755-2081

* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

한 운동방정식을 유도하면, 구조적 감쇠를 고려한 n-자유도계 시스템의 운동방정식은 일반화된 좌표계에 대하여 다음과 같이 행렬형태로 유도할 수 있다.

$$[M_g]\{\ddot{q}(t)\} + [C_g]\{\dot{q}(t)\} + [K_g]\{q(t)\} = \{Q(t)\} \quad (1)$$

여기서, $\{q(t)\}^T = [q(t)_1, q(t)_2, q(t)_3, \dots, q(t)_n]$ 은 일반화된 변위벡터(generalized displacement vector)를, $[M_g]$ 은 일반화된 질량행렬, $[C_g]$ 는 일반화된 감쇠행렬, $[K_g]$ 는 일반화된 강성행렬을 의미하며, $\{Q(t)\}$ 는 시간영역에서의 일반화된 공기력 벡터를 나타내며 다음과 같다.

$$Q(t)_i = \frac{1}{2} \rho U^2 c_r^2 \int_s \psi_i(x, y, z) \Delta C_p(x, y, z, t) \frac{dS}{c_r^2} \quad (2)$$

위 식에서 첨자 'i'는 영향(influence) 모드를 의미하며, ψ 는 고유모드 벡터를, S는 건물의 투영면적을, ρ 는 자유흐름 밀도를, ΔC_p 는 건물 앞, 뒷면에서 압력계수 차를 의미한다.

지배 운동방정식인 식(1)의 동적 공탄성 방정식에 대한 해는 비정상 비선형 CFD코드와 연계하여 주파수 영역과 시간영역에서 구해질 수 있다. 유동장의 비선형성이 강한 경우는 기존의 주파수 영역 해석방법으로 안정성 판단이 곤란한 경우가 발생할 수 있다. 하지만, 연계시간적분법의 경우 구체적 동적 응답을 실제적으로 관찰할 수 있어 비선형 거동특성을 물리적으로 파악할 수 있는 중요한 장점이 있다. 연계시간 적분법의 세부적인 수치기법은 Ref.1을 참조하기 바란다.

2.2 비정상 Navier-Stokes 방정식

비정상 압축성 Reynolds-averaged Navier-Stokes (N/S) 유동해석 지배 방정식은 다음과 같이 보존형으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\tau_{ij} + R_{ij}] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 점성 응력 텐서(stress tensor)와 변형 텐서(deformation tensor)는 다음과 같이 정의 된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu \left[S_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

또한 난류 레이놀즈 응력 텐서(turbulence Reynolds stress tensor)인 R_{ij} 는 다음의 Boussinesq 가설에 따라서 근사화 될 수 있다.

$$R_{ij} \cong \mu_T \left[S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} (pk) \delta_{ij} \quad (5)$$

식(3)~(5)는 전산유체해석을 위해서 공간 이산화와 시간 이산화 과정을 거쳐 연립대수방정식으로 변환되고, 이 연립대수방정식을 풀어 이산화된 지배방정식에 대한 해를 구하게 된다.

본 연구에서는 공간 이산화를 위해, 지배방정식을 적분 형태로 표시하여 제어체적(control volume)에 대하여 발산 정리(divergence theorem)를 적용함으로써 면적분의 형태로 계산하는 유한 체적법(finite volume method)을 적용하였다. 또한 시간이산화를 위해서는 부가적인 인공 점성항을 사용하지 않아도 충격파 주위에서 수치적인 진동 없이 안정된 해를 구해주는 풍상 차분법(upwind scheme)을 적용하였다. 본 연구에서는 N/S 해석을 위해 Boussinesq 가설에 근간을 두고 있는 1차 방정식 난류모델인 Spalart-Allmaras(S-A)를 적용하였다.

3. 해석 결과 및 검토

본 연구에서는 3차원 고층 빌딩 형상에 대한 유체유발진 동해석을 위해 풍동실험을 통하여 유동해석 결과가 제시되어 있는 모델을 선정하였다. 고려한 모델은 64m×33m×116m (가로×세로×높이)이며, 고층 건물의 최상층에서 발생하는 진동응답 특성을 제시하였다. 구조의 총 질량은 3.8×10^7 kg 이며, NS방향의 고유진동수는 0.6Hz, EW 방향의 고유진동수는 0.45Hz이다.

Table 1 Design specification of Tall Building

Parameter	Measurement
Total Mass (kg)	3.8×10^7
Natural Frequency NS (Hz)	0.60
Natural Frequency EW (Hz)	0.45
Natural Frequency Min. (Hz)	0.45
Damping NS, ζ	0.009
Damping EW, ζ	0.011